乌鲁木齐市$PM_{2.5}$中碳组分污染特征及来源解析

魏 疆[1]， 宋丹丹[2]， 赵丽莉[3]， 赵彩欣[1]， 王凌羲[4]

（1. 新疆财经大学公共管理学院，新疆 乌鲁木齐 830012；2. 新疆财经大学旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830012；
3. 新疆乌鲁木齐市生态环境监测中心站，新疆 乌鲁木齐 830000；
4. 新疆乌鲁木齐城市生态系统国家定位观测研究站，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘 要：为研究乌鲁木齐市主要大气污染物$PM_{2.5}$中的碳组分的浓度、污染特征及来源，于2023年7月3日—12月31日在市区按照监测规范采集$PM_{2.5}$样品，并按照实验规程进行分析。结果表明：(1) 乌鲁木齐市$PM_{2.5}$的平均浓度为20.1±8.1 $\mu g \cdot m^{-3}$，有机碳（OC）和元素碳（EC）的平均浓度分别为：3.2±1.0 $\mu g \cdot m^{-3}$和0.6±0.2 $\mu g \cdot m^{-3}$，数值上呈现出采暖期大于非采暖期的趋势。(2) 各时段OC和EC均呈现出较好的相关性，表明OC和EC具有相似的来源。(3) 通过估算得到总碳气溶胶（TCA）浓度均值为7.52±3.66 $\mu g \cdot m^{-3}$，占$PM_{2.5}$浓度比重约为16%；而二次有机碳SOC浓度为2.11±1.43 $\mu g \cdot m^{-3}$，且SOC/OC比值为47.47%±12.69%，表明乌鲁木齐市大气中二次有机碳（SOC）占OC的比重接近50%。(4) 通过主成分分析得出，$PM_{2.5}$中碳组分主要来源于燃煤排放和机动车尾气的排放。综合来看，采暖期大气环境污染依然严峻。

关键词：大气污染；有机碳；元素碳；源解析；乌鲁木齐市

乌鲁木齐作为以煤为主要能源的城市，大气污染状况长期以来备受社会各界的关注，特别是中央提出"打好污染防治攻坚战"中，明确提出将以乌鲁木齐市为首的天山北坡经济带城市群的大气环境质量重污染天数全年控制在1%以下[1]，同时，在《建设美丽中国》方案中提出持续深入打好蓝天保卫战，到2027年，全国细颗粒物平均浓度下降至28 $\mu g \cdot m^{-3}$以下，各地级及以上城市力争达标；到2035年，全国细颗粒物浓度下降至25 $\mu g \cdot m^{-3}$以下，实现空气常新、蓝天常在[2]。这对乌鲁木齐市大气环境污染防治提出了更高的要求和工作目标。虽然，近年来乌鲁木齐市的环境质量呈现出持续好转的态势，但冬季大气污染问题依然严峻。

从监测数据来看，$PM_{2.5}$是造成乌鲁木齐市大气环境污染的主要污染物，且呈现出季节性变化明显、污染频率高等特点，其形成过程和构成组分相对比较复杂[3-5]。有研究表明，碳占$PM_{2.5}$的比重较大，其组分主要分为有机碳（OC）和元素碳（EC）[6]，而OC和EC的比例差异可以客观地反映出污染物的不同来源。这主要是与OC和EC的形成过程有着密切的关系，OC即可形成于污染源直接排放的一次有机碳（POC），也可以形成于高温辐射条件下气态前体物的光化学反应生成物质，即二次有机碳（SOC）；EC主要源于生物质和化石燃料的不完全燃烧，化学性质相对稳定常被作为大气污染物质的示踪物，其表面具有较强的吸附能力易使半挥发物质形成富集，进而诱发化学反应，产生新的组分。因此，科学客观地分析$PM_{2.5}$中碳组分浓度及其变化，不仅有助于正确认识大气污染物的构成，更有助于对污染物的来源进行判断，从而能更好的从源头对污染物质的排放进行控制，改善大气环境质量。本研究以乌鲁木齐市2023年7—12月$PM_{2.5}$中碳质组分为研究对象，通过$PM_{2.5}$膜采样收集大气环境质量样品，分析其碳质组分污染特征及其来源，以期为乌鲁木齐市的蓝天保卫战提供参考。

1 研究方法

1.1 样品采集

在乌鲁木齐市中部四平路架设RG4702多通

收稿日期：2024-02-16； **修订日期：**2024-05-28
基金项目：新疆财经大学高层次人才专项（博士启动基金）项目（2022XGC013）
作者简介：魏疆（1975-），男，博士，副教授，主要从事区域可持续发展研究. E-mail: weijiang@xjufe.edu.cn

道大气颗粒物采样器进行样本的采集，其采样位置如图1所示。选用石英滤膜，采样监测频次为1次·$(3d)^{-1}$，如遇以$PM_{2.5}$为首要污染物的空气重污染天气（重度污染和严重污染，以重污染天气预警通知为准），监测频次为1次·d^{-1}；采样时长为每日11:00—次日10:00，时长23 h。采样前对采样仪的流量等参数进行校准。采样后将滤膜置于4 ℃下保存以备实验室进行分析测定。采样时段为2023年7月1日—12月31日，工作周期内共采集样品71张。

1.2 样品分析

用DRI Model 2015多波段有机碳/元素碳分析仪对采样膜进行碳组分进行测定，OC和EC的最低检测限（MDL）分别为0.43 μg·cm^{-2}和0.12 μg·cm^{-2}。测定过程中，先采用设备内部自带IMPROVE_A进行梯度升温，热分解过程分两个阶段：（1）在无氧纯氦环境中，将过滤膜逐步加热到140 ℃、280 ℃、480 ℃和580 ℃，使其在各阶段逐步释放有机碳（OC）的4种组成部分，即OC1、OC2、OC3和OC4。（2）过滤膜置于含有氧气（2%）的氦气环境中，进一步加热至580 ℃、740 ℃和840 ℃，分离出样品中元素碳（EC）的3个组成部分，即EC1、EC2和EC3。升温过程中，利用还原炉将产生的二氧化碳（CO_2）转化为甲烷（CH4），CH4的生成量用火焰离子化检测器（FID）测定量化。全程用633 nm激光照射样品，测定裂解碳（OPC）的生成量。根据IMPROVE分析协议，计算OC和EC的浓度，即：OC=OC1+OC2+OC3+OC4+OPC，EC=EC1+EC2+EC3−OPC。

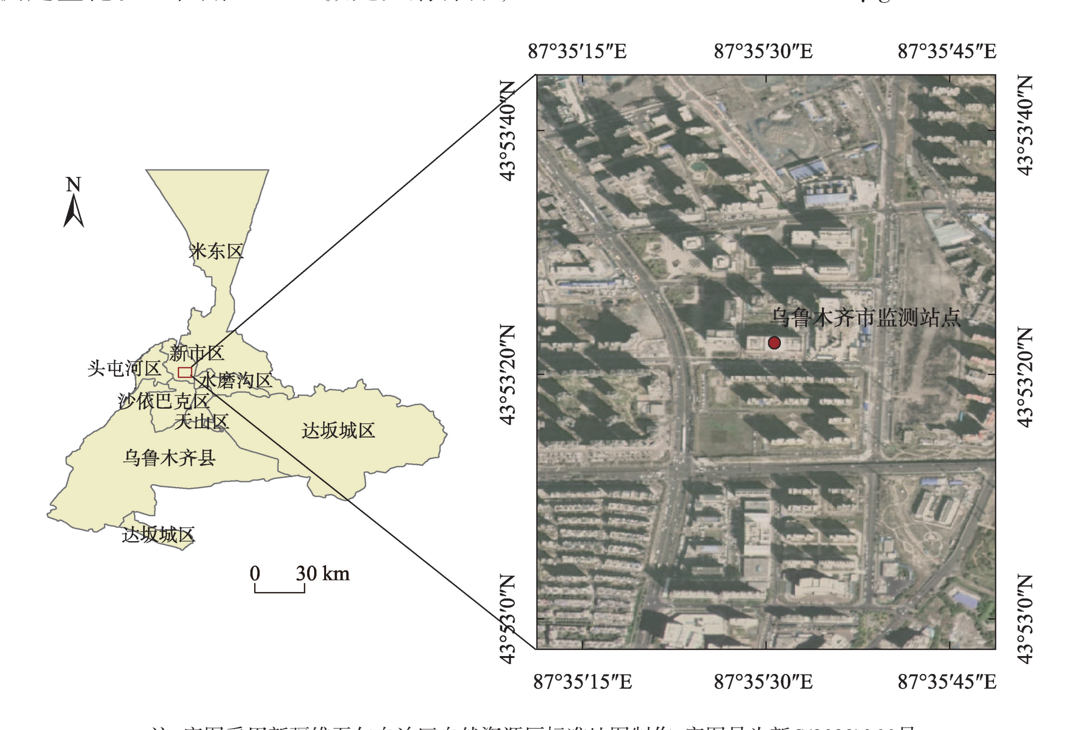
1.3 质量控制与保证

采样前，将石英膜放置在马弗炉500 ℃灼烧4 h，以确保膜上的有机物和其他杂质全部去除，烧好的石英膜放在一次性密封盒中在4 ℃以下低温密封保存。每次运输及采样过程均需携带全程序空白膜，实际样品分析结果要减去全程序空白，并应用与待测样品膜相同的分析条件测试空白样品。每一批样品预处理完之后（马弗炉500 ℃灼烧4 h），都做一个样品空白，取两个或者这批膜的2%，TC（总碳，数值为有机碳与元素碳之和）≤1 μg·cm^{-2}，进行质控。每次开机至少做一个蔗糖（或KHP）样品的质控样，其TC值与标准值相差应不超过5%，每次更换氧化炉、还原炉或者氦甲烷混合气时，应重新绘制标准曲线，并及时更新运行参数文件中的斜率值，以确保仪器的稳定校准。

2 结果与分析

2.1 $PM_{2.5}$浓度变化特征

采样期内，$PM_{2.5}$日均浓度呈现出不断波动的态势，变化幅度在11~206 μg·m^{-3}之间，均值为46.9±



注：底图采用新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图制作，审图号为新S(2023)066号。

图1 $PM_{2.5}$监测站点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of $PM_{2.5}$ monitoring stations

44.3 μg·m^{-3}；其中非采暖期（10月15日前）日均浓度相对较低，进入采暖期后日均浓度呈现出整体抬升的态势，期间受降水天气过程的影响，浓度值有明显的降低（图2）。从监测数据来看，非采暖期$PM_{2.5}$的日均浓度范围在11.00~43.00 μg·m^{-3}，平均浓度值为20.09±8.08 μg·m^{-3}，采暖期$PM_{2.5}$的日均浓度在12~206 μg·m^{-3}，平均浓度值为73.14±49.31 μg·m^{-3}（表1）。采暖期$PM_{2.5}$的平均浓度值是非采暖的3.64倍。以《环境空气质量标准》中$PM_{2.5}$二级年均浓度标准为参考（35 μg·m^{-3}），乌鲁木齐市非采暖期的$PM_{2.5}$的浓度值较低，空气质量良好，而采暖期平均浓度值和最大浓度都呈现出快速上升的趋势，平均浓度是标准的2倍多，而日均最大浓度值是标准的2.75倍（二级日均浓度限值为75 μg·m^{-3}），其中采样期$PM_{2.5}$浓度超标天数占比达33.33%。表明乌鲁木齐市采暖期$PM_{2.5}$污染形势依然严峻。

2.2　OC和EC浓度变化特征

如图2所示，OC和EC的浓度波动范围分别为1.87~10.80 μg·m^{-3}和0.204~1.67 μg·m^{-3}，平均质量浓度为4.18±2.11 μg·m^{-3}和0.82±0.32 μg·m^{-3}，其不同时段的均值浓度见表1。两个浓度变化直接影响着大气污染物中总碳气溶胶（TCA）的浓度变化，通常认为总碳气溶胶浓度等于有机物（OM）与EC浓度之和，而有机物的含量常用1.6倍的OC量来替代[7-8]，即TCA=1.6×OC+EC。计算得出乌鲁木齐市TCA的均值为7.52±3.66 μg·m^{-3}。

$PM_{2.5}$中的碳组分浓度变化具有明显的季节性特征，$PM_{2.5}$、OC和EC的浓度变化均呈现出采暖期大于非采暖期，分别增长了3.63倍、1.59倍和1.67倍。由于浓度增长幅度的差异，导致OC、EC和TCA在$PM_{2.5}$中的占比也存在着较大的变化，总碳气溶胶（TCA）在非采暖期的占比达到了28.4%，全时段占比为16.0%。由此可见，碳气溶胶组分是构成$PM_{2.5}$的重要物质，且在非采暖期的影响更大。

2.3　OC和EC的关系及SOC的估算

以往研究证实，可以通过OC和EC之间的相关

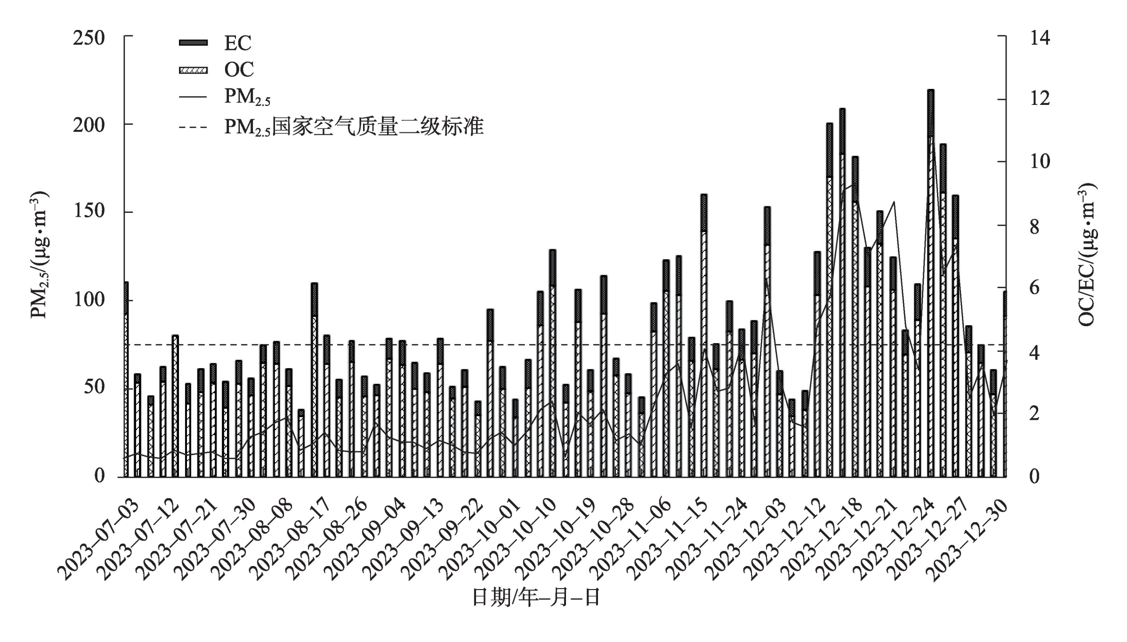


图2　$PM_{2.5}$、OC和EC日均质量浓度变化

Fig. 2　Daily average mass concentrations of $PM_{2.5}$, OC, and EC

表1　$PM_{2.5}$中OC、EC和TCA浓度变化及占比

Tab. 1　Variations and proportions of OC, EC, and TCA concentrations in $PM_{2.5}$

采样时段	样本	$PM_{2.5}$	OC	EC	TCA	OC/$PM_{2.5}$	EC/$PM_{2.5}$	TCA/$PM_{2.5}$
	n	/(μg·m^{-3})				/%		
非采暖期	35	20.1±8.1	3.2±1.0	0.6±0.2	5.72±1.8	15.9±12.3	3.0±2.5	28.4±22.2
采暖期	36	73.1±49.3	5.1±2.4	1.0±0.3	9.16±4.14	6.9±4.8	1.4±0.6	12.5±8.4
全时段	71	46.9±44.3	4.2±2.1	0.8±0.3	7.52±3.66	8.9±4.7	1.7±0.7	16.0±8.3

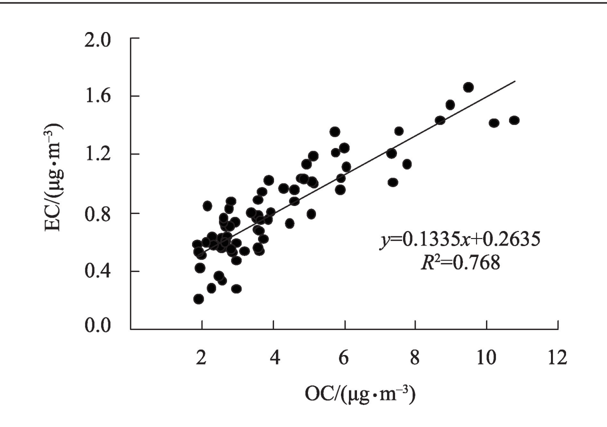


图3 采样期大气污染物中OC和EC浓度的拟合

Fig. 3 Fitting of OC and EC concentrations in atmospheric pollutant

关系来判断和分析细微颗粒物中碳组分的来源，如两者相关性高，则认为其可能具有同源性[9]。实验数据结果显示，$PM_{2.5}$中的OC和EC呈现出较好的相关性(R^2=0.876，P<0.01)，线性拟合较好(图3)，其中非采暖期相关系数为0.723(P<0.01)，采暖期的相关系数为0.901(P<0.01)，说明OC和EC具有较强的同源性，特别是采暖期同源性更为显著。

OC和EC的比值常被用来识别大气污染物中碳质气溶胶的排放特征以及二次有机碳形成特征。以往研究认为，OC/EC的值在1.0~4.2之间，表明两者的来源主要源于汽油和柴油车的尾气[10]，2.5~10.5之间则主要源于燃煤的排放[11]，16.8~40.0之间则来源于生物质燃烧[12]，32.9~81.6则主要源于餐饮油烟的排放[13]。研究期内，OC/EC的比值范围为2.55~10.85，均值为5.14±1.47，表明乌鲁木齐市大气环境中$PM_{2.5}$中的碳组分来源主要是燃煤和机动车尾气的排放，其中非采暖期的范围在2.55~10.85(n=35)，均值为5.20±1.75，而采暖期则为3.41~7.50(n=36)，均值为5.09±1.15。比较来看，均值变化不大，但采暖期的浓度范围更加集中。

通常用OC/EC计算结果，来判定大气环境中是否有二次有机碳(SOC)的生成[14]，二次有机碳对碳组分的浓度有着直接的影响，认为比值>2，则有二次有机碳(SOC)产生，其浓度计算方法通常采用排放源清单法和最小OC/EC值法进行推算。其浓度经验估算公式为[15]：

$$SOC=OC-EC\times(OC/EC)_{min}$$

式中：SOC为二次有机碳的浓度(μg·m^{-3})；OC和EC分别表示采样期间OC和EC日均浓度(μg·m^{-3})；$(OC/EC)_{min}$为采样周期内OC和EC的最小比值。

计算得出SOC的质量浓度为2.11±1.43 μg·m^{-3}，其中非采暖期和采暖期分别为1.55±0.66 μg·m^{-3}和2.65±1.74 μg·m^{-3}；SOC/OC比值为47.47%±12.69%，其中非采暖期和采暖期分别为47.52%±13.97%和47.42%±11.55%。表明乌鲁木齐市大气中二次有机碳(SOC)占OC的比重接近50%。

2.4 碳组分源解析

研究表明，大气污染物中的碳组分的来源可分为：OC1主要源于生物质的燃烧排放[16]，OC2主要源于燃煤排放[17]，OC3、OC4、EC1主要源于汽油机动车尾气排放[18]，EC2、EC3主要源于柴油车尾气排放[19]，OPC主要代表大气污染物中水溶性极性化合物的主要成分。

利用SPSS 26.0软件，分别对乌鲁木齐市采暖期和非采暖期$PM_{2.5}$样品中碳组分进行主成分分析(巴特利特球形度检验结果均为0.00<0.05)，分析结果如表2所示。非采暖期提取2个因子，累计解释方差贡献率为84.58%，非采暖期因子1与碳组分OC2、OC3、OC4和EC1有很高的相关性，系数分别为0.854、0.955、0.963和0.892，因子2与EC2有很高的相关性，系数为0.876；采暖期因子1与碳组分OC2、OC4和EC1的相关性较高，系数分别为0.888、0.941和0.964，因子2仅与EC2相关性较高，系数为0.915。根据前文提及的来源特征组分可以判断，非采暖期和采暖期，大气环境中细微颗粒物$PM_{2.5}$中的碳组分主要来源均为燃煤排放和机动车尾气的排放，从相关系数上判断，机动车尾气相关性要大于

表2 旋转后因子载荷矩阵

Tab. 2 Rotated factor loading matrix

参数	非采暖期		采暖期	
	因子1	因子2	因子1	因子2
OC1	0.332	0.792	0.769	0.265
OC2	0.854	0.245	0.888	0.132
OC3	0.955		0.531	−0.357
OC4	0.963	−0.146	0.941	
EC1	0.892	−0.332	0.964	−0.138
EC2		0.876		0.915
EC3				
OPC	0.765		0.674	
特征值	3.48	1.59	3.47	1.07
解释方差/%	57.98	26.6	57.97	17.88
累计解释方差/%	84.58		75.86	

燃煤排放的相关性,从周期来看,采暖期的相关系数明显高于非采暖期,呈现出采暖期特征污染物浓度进一步加剧的态势,这一结果与前文OC/EC比值分析的碳质气溶胶来源的结论具有较好的一致性。

3 讨论

3.1 $PM_{2.5}$浓度季节性变化分析

$PM_{2.5}$作为主要的大气污染物,其浓度呈现出明显的季节性变化,与研究区特殊的地理位置和气候有着密不可分的关系。采暖期供热等生产生活对能源消耗的需求不断增加,从而增加了污染物质的排放;同时,气温的降低使得逆温层出现的频率、厚度和强度都有大幅度增加,一定程度上限制了污染物质在垂直方向上的扩散,而冬季静风频率的增多,又限制了污染物在水平方向上的迁徙,使得采暖期污染物排放量增加的前提下,其自然扩散条件反而降低,导致环境质量明显下降,从而造成严重的大气污染现象[20]。从纵向对比来看,$PM_{2.5}$浓度呈现出明显的下降趋势[21],较10 a前的日均浓度值下降了10 $\mu g \cdot m^{-3}$,这得益于政府近年来加强环境管理和加大污染治理的成效[22]。

3.2 OC和EC浓度变化分析

OC和EC浓度测定均源于$PM_{2.5}$的样品采集,故其浓度变化与$PM_{2.5}$具有一致性,但不同时期浓度数值则反映出各污染物的增长幅度存在较大差异,即$PM_{2.5}$>EC>OC。表明采暖期$PM_{2.5}$浓度的快速增加除碳组分外,还受到别的物质组分影响;结合OC和EC的主成分分析结果可以看出,采暖期载荷因子系数明显增加,说明冬季OC和EC浓度升高主要是因为燃煤排放的污染物和机动车尾气排放量的增加,除地理环境和气象因素外,需要注意的是冬季机动车预热时间较长、行驶速度降低,会使得同样多的机动车保有量,因气温变化排放过量的污染物质,如在−1 ℃时机动车尾气中的OC含量是21 ℃的7.6倍[23],怠速低于20 $km \cdot h^{-1}$时,污染物的排放量是40 $km \cdot h^{-1}$的2倍[24]。

OC和EC浓度的变化直接影响着总碳气溶胶(TCA)和二次有机碳(SOC)的浓度。从TCA的浓度变化来看,非采暖期明显大于采暖季,均值为28.4±22.2 $\mu g \cdot m^{-3}$基本与广州市的监测浓度27.0±16.6 $\mu g \cdot m^{-3}$一致,即夏秋季TCA占$PM_{2.5}$浓度的28.4%,说明含碳气溶胶组分是$PM_{2.5}$的重要组成部分。而不同时期碳组分占$PM_{2.5}$中的比例各异,但均表现出非采暖期大于采暖期,这与广州市得出的结论相一致[8],主要是因为冬季$PM_{2.5}$浓度增加的速度明显快于各类碳组分浓度的增加速度,使得其比例显著下降。二次有机碳(SOC)的形成取决于OC/EC比值,大多数城市大气污染浓度中OC/EC在1~4之间[25],本研究中OC/EC的变化范围在2.55~10.85,均值在5.14±1.46,与西安和成都等城市接近[26-27],说明乌鲁木齐市存在SOC污染,且比较严重。

3.3 国内主要城市的比较

为了更好的了解乌鲁木齐市大气环境中碳组分污染水平,这里列举一些国内主要城市进行对比[28-32],如表3所示。

通过近年来国内大城市相关研究结果的对比可以看出,乌鲁木齐市大气污染物中OC和EC的浓度值很低,这可能与研究时段有关,除兰州的实验数据相对接近外(2020年),其他城市的实验数据均在国家实施"蓝天工程"之前,此时城市大气环境污染相对严重,乌鲁木齐市亦然如此。相对较高的OC/OE比值,表明大气环境污染物中转化为二次有机碳(SOC)机率较高,计算结果显示其浓度值相对较低,但是占OC的比例较高,接近50%,在已有研究中属较高水平,说明SOC依然是不容忽视的大气污染物质。

相对于前期研究结果而言,当前乌鲁木齐市大气污染物中OC和EC浓度有了大幅度的下降,这与前些年的城市能源结构调整[33],近年来政府加强空气质量综合整治以及"蓝天保卫战"的实施有着直接的关系。

4 结论

(1) 乌鲁木齐市非采暖期$PM_{2.5}$平均浓度为20.1±8.1 $\mu g \cdot m^{-3}$,其中OC和EC的平均浓度分别为3.2±1.0 $\mu g \cdot m^{-3}$和0.6±0.2 $\mu g \cdot m^{-3}$;采暖期$PM_{2.5}$平均浓度为73.1±49.3 $\mu g \cdot m^{-3}$,其中,OC和EC的平均浓度分别为5.1±2.4 $\mu g \cdot m^{-3}$和1.0±0.3 $\mu g \cdot m^{-3}$。

(2) 估算的总碳气溶胶(TCA)均值为7.52±3.66 $\mu g \cdot m^{-3}$,其中非采暖季为5.72±1.8 $\mu g \cdot m^{-3}$,采暖期为9.16±4.14 $\mu g \cdot m^{-3}$,分别占$PM_{2.5}$浓度比重为28.4%和12.5%。

表3 国内主要城市OC、EC 、OC/EC、SOC和SOC/OC浓度水平

Tab. 3 Concentration levels of OC, EC, OC/EC, SOC, and SOC/OC in major cities in China

城市	采样时间	OC	EC	OC/EC	SOC	SOC/OC
乌鲁木齐	2023年秋季	3.2±1.0	0.6±0.2	5.2±1.75	1.54±0.66	47.52±13.97
	2023年冬季	5.1±2.4	1.0±0.3	5.09±1.15	2.64±1.74	47.42±11.55
乌鲁木齐	2011年秋季	11.53±3.10	2.8±0.92	4.11±3.37	3.01±2.56	24.88±18.38
	2011年冬季	29.30±15.19	3.56±1.11	8.23±13.68	11.98±11.15	33.32±12.87
兰州	2020年	10.22±3.59	1.19±0.64	8.58±5.60	3.63±1.95	0.355
西安	2012年冬季	47.8	8.5	5.8	21.6	0.4519
北京	2017年冬季	23.98	5.02	4.39		48.09
石家庄	2017年冬季	35.75	9.22	3.85		44.98
天津	2018年冬季	18.69±7.95	4.98±2.08	4.03	6.89±5.19	0.362
上海	2018年冬季	7.28±3.11	1.05±1.25	14.13	4.19±2.00	0.593
青岛	2018年冬季	16.45±8.94	2.01±1.04	8.2	6.99±5.27	0.397
禹城地区	2017年秋季	6.03±3.06	4.67±2.45	1.41±0.6		58.00±6.0
	2017年冬季	14.94±6.04	6.57±2.86	2.33±0.35	8.63±3.63	
广州市	2015年冬季	10.94±4.91	3.59±1.64		4.3	47.3
	2015年秋季	9.69±4.92	4.79±3.42	2.8±1.0	6.9	62.4

（3）用最小OC/EC比值法估算SOC浓度，得出SOC的质量浓度为2.11±1.43 $\mu g\cdot m^{-3}$，其中非采暖期和采暖期分别为1.55±0.66 $\mu g\cdot m^{-3}$和2.65±1.74 $\mu g\cdot m^{-3}$，且SOC/OC比值为47.47±12.69，其中非采暖期和采暖期分别为47.52±13.97 $\mu g\cdot m^{-3}$和47.42±11.55 $\mu g\cdot m^{-3}$。表明乌鲁木齐市大气中二次有机碳（SOC）占OC的比重接近50%。

（4）对OC和EC浓度进行相关性分析，结果表明两者相关性显著，且采暖期相关系数大于非采暖期，说明二者具有相同的一次来源的可能性较大。通过比值方法和主成分分析，对大气污染物$PM_{2.5}$的源进行解析，得出乌鲁木齐市非采暖期和采暖期的$PM_{2.5}$的碳组分主要源于燃煤的排放和机动车尾气的排放；受气象条件的影响，采暖期对环境的影响要显著大于非采暖期。

（5）通过国内城市OC和EC浓度及相关指标的对比，乌鲁木齐市的大气污染处于中上水平。纵向比较可以看出，在“蓝天保卫战”等行动的指引下，乌鲁木齐市通过能源结构调整、加大污染治理等措施，使城市大气环境质量已经有了根本性的好转。

参考文献（References）：

[1] 新华通讯社. 中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/2021-11/07/c_1128040858.htm, 2021-11-07. [Xinhua News Agency. Central committee of the communist party of China, state council. “Opinions on deepening the fight against pollution prevention and control”[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/2021-11/07/c_1128040858.htm, 2021-11-07.]

[2] 新华通讯社. 中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/2024-01/11/b1e10e998f644683b7e64d8bf8ff589b/c.html, 2024-01-11. [Xinhua News Agency. Central committee of the communist party of China, state council. “Opinions on promoting the comprehensive construction of beautiful China” [EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/2024-01/11/b1e10e998f644683b7e64d8bf8ff589b/c.html, 2024-01-11.]

[3] 许君利, 韩海东, 王建. 新疆大气$PM_{2.5}$来源与潜在贡献源分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 874-884. [Xu Junli, Han Haidong, Wang Jian. Recharge sources and potential source areas of atmospheric $PM_{2.5}$ in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 874-884.]

[4] 国纪良, 姬亚芹, 马妍, 等. 盘锦市夏冬季$PM_{2.5}$中碳组分污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3201-3206. [Guo Jiliang, Ji Yaqin, Ma Yan, et al. Pollution characteristics and sources of carbon components in $PM_{2.5}$ during summer and winter in Panjin City[J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3201-3206.]

[5] 刘子龙, 代斌, 崔卓彦, 等. 大气污染物浓度变化特征及潜在源分析——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 562-569. [Liu Zilong, Dai Bin, Cui Zhuoyan, et al. Concentration characteristics and potential source of atmospheric pollutants: A case study in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 562-569.]

[6] Huang L, Brook J R, Zhang W, et al. Stable isotope measurements of carbon fractions (OC/EC) in airborne particulate: A new dimension for source characterization and apportionment[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(15): 2690-2705.

[7] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to $PM_{2.5}$ mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass[J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 35(1): 602-610.

[8] 张晓雨, 赵欣, 应蓉蓉, 等. 广州大气$PM_{2.5}$中含碳组分的污染特征及来源解析[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(7): 659-666. [Zhang Xiaoyu, Zhao Xin, Ying Rongrong, et al. Characteristics and source appointments of carbonaceous components in atmospheric fine particles in Guangzhou[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(7): 659-666.]

[9] Khan M F, Shrasuna Y, Hirano K, et al.Characterization of $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$ and $PM_{>10}$ in ambient air, Yokohama, Japan[J]. Atmospheric Research, 2010, 96(1): 159-172.

[10] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 2: C{sub 1} through C{sub 30} organic compounds from medium duty diesel trucks[J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(10): 1578-1587.

[11] Chen Y, Zhi G, Feng Y, et al. Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(20): 382-385.

[12] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources.3. C_1-C_{29} organic compounds from fireplace combustion of wood[J]. Environmental Science and technology, 2001, 35(9): 1716-1728.

[13] He L Y, Hu M, Huang X F, et al. Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(38): 6557-6564.

[14] Chow J C, Watson J G, Lu Z, et al. Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(12): 2079-2112.

[15] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS[J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(23): 3527-3544.

[16] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 基于重庆本地碳成分谱的$PM_{2.5}$碳组分来源分析[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 810-819. [Zhang Can, Zhou Zhi'en, Zhai Chongzhi, et al. Carbon source apportionment of $PM_{2.5}$ in Chongqing based on local carbon profiles[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 810-819.]

[17] Xu H, Cao J, Chow J C, et al. Inter-annual variability of wintertime $PM_{2.5}$ chemical composition in Xi'an, China: Evidences of changing source emissions[J]. Science of the Total Environment, 2016, 545: 546-555.

[18] Cao J J, Wu F, Chow J C, et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(11): 3127-3137.

[19] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H, et al. Differences in the carbon composition of source profiles for diesel-and gasoline powered vehicles[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(15): 2493-2505.

[20] 魏疆, 王国华, 任泉, 等. 乌鲁木齐市大气污染物浓度计量模型研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 896-900. [Wei Jiang, Wang Guohua, Ren Quan, et al. Study on quantitative models of concentrations of air pollutants over Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 896-900.]

[21] 孙蓉花, 陈学刚, 魏疆, 等. 乌鲁木齐市$PM_{2.5}$浓度与气象条件耦合分析[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(12): 1353-1357. [Sun Ronghua, Chen Xuegang, Wei Jiang, et al. Coupling analysis of $PM_{2.5}$ concentrations and meteorological conditions in Urumqi[J]. Environmental Pollution and Control, 2017, 39(12): 1353-1357.]

[22] 中国政府网. "乌-昌-石"空气质量取得较为明显改善[EB/OL]. https://www.Xinjiang.gov.cn/Xinjiang/bmdt/202404/3d88febec9824433b32e2808eab5b4d4.shtml, 2024-04-26. [The Website of the Central People's Government of the PRC. Significant improvement observed in air quality in the "Urumqi-Changji-Shihezi" area [EB/OL]. https://www.Xinjiang.gov.cn/Xinjiang/bmdt/202404/3d88febec9824433b32e2808eab5b4d4.shtml, 2024-04-26.]

[23] Zielinska B, Sagebiel J, Mcdonald J D, et al. Emission rates and comparative chemical composition from selected In-use diesel and gasoline-fueled vehicles[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54(9): 1138-1150.

[24] 魏疆, 陈学刚, 任泉, 等. 乌鲁木齐冬季气溶胶散射吸收特性[J]. 中国环境监测, 2014, 30(1): 20-24. [Wei Jiang, Chen Xuegang, Ren Quan, et al. Scattering and absorption properties in winter aerosol of Urumqi[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(1): 20-24.]

[25] Kunwar B, Kawamura K. One-year observations of carbonaceous and nitrogenous components and major ions in the aerosols from subtropical Okinawa Island, an outflow region of Asian dusts[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(4): 1819-1836.

[26] 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 关中地区冬季$PM_{2.5}$中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 427-433. [Tian Pengshan, Cao Junji, Han Yongming, et al. Pollution characteristics and sources of carbonaceous aerosol in $PM_{2.5}$ during winter in Guanzhong Area[J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 427-433.]

[27] 石慧斌, 黄艺, 程馨, 等. 成都市冬季$PM_{2.5}$中碳组分污染特征及来源解析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1420-1427. [Shi Huibin, Huang Yi, Cheng Xin, et al. Pollution characteristics and sources of carbonaceous components in $PM_{2.5}$ during winter in Chengdu [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(7): 1420-1427.]

[28] 王果, 迪丽努尔·塔力甫, 买里克扎提·买合木提, 等. 乌鲁木齐市$PM_{2.5}$和$PM_{2.5-10}$中碳组分季节性变化特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 356-362. [Wang Guo, Dilnur Talip, Mailikezhati Maihemuti, et al. Seasonal changes of carbonaceous speeies in $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ in Urumqi[J]. China Environmental Science, 2016, 36

(2): 356−362.]

[29] 王恬爽, 牛笑应, 文惠, 等. 兰州地区大气污染的化学组成及来源解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(11): 351−360. [Wang Tianshuang, Niu Xiaoying, Wen Hui, et al. Chemical composition and source attribution of air pollutants in Lanzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(11): 351−360.]

[30] 张俊峰, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀地区典型城市大气细颗粒物碳质组分污染特征及来源[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1729−1739. [Zhang Junfeng, Han Lihui, Cheng Shuiyuan, et al. Characteristics and sources of carbon pollution of fine particulate matter in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(8): 1729−1739.]

[31] 于涛, 刘亚妮, 任丽红, 等. 中国典型沿海城市冬季$PM_{2.5}$中碳组分的污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 113−124. [Yu Tao, Liu Yani, Ren Lihong, et al. Pollution characteristics and sources analysis of carbon components in $PM_{2.5}$ in winter at typical coastal cities of China[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(1): 113−124.]

[32] 曹宇坤, 温天雪, 张小玲, 等. 华北典型农业区$PM_{2.5}$组分分析与来源解析[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 819−832. [Cao Yukun, Wen Tianxue, Zhang Xiaoling, et al. Component and source analyses of $PM_{2.5}$ in typical agricultural regions of North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(4): 819−832.]

[33] 魏疆, 陈学刚, 任泉, 等. 乌鲁木齐市能源结构调整对冬季大气污染物浓度的影响[J]. 干旱区研究, 2015, 31(1): 155−160. [Wei Jiang, Chen Xuegang, Ren Quan, et al. Effects of energy restructuring on air pollutant concentrations in winter in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2015, 31(1): 155−160.]

Analysis of carbon component pollution characteristics and sources of $PM_{2.5}$ in Urumqi City

WEI Jiang[1], SONG Dandan[2], ZHAO Lili[3], ZHAO Caixin[1], WANG Lingxi[4]

(1. School of Public Administration, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, Xinjiang, China; 2. School of Tourism Administration, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Urumqi Ecological Environment Monitoring Center Station, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Urumqi Urban Ecosystem National Research Station, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: To investigate the concentration of $PM_{2.5}$, pollution characteristics, and sources of carbon components in the urban area of Urumqi from July 3, 2023, to December 31, 2023, air samples were collected and monitoring and analysis were performed in accordance with experimental procedures. The average concentration of $PM_{2.5}$ in Urumqi is 20.1±8.1 μg·m^{-3}, with average concentrations of OC and EC of 3.2±1.0 and 0.6±0.2 μg·m^{-3}, respectively, and a trend for higher concentrations during the heating season than the nonheating season. Good correlations between OC and EC were observed in various time periods, suggesting a similar source for OC and EC. The estimated average total carbon aerosol concentration is 7.52±3.66 μg·m^{-3}, accounting for approximately 16% of the $PM_{2.5}$ concentration, and the concentration of secondary organic carbon (SOC) is 2.11±1.43 μg·m^{-3}, with an SOC/OC ratio of 47.47%±12.69%, indicating that secondary organic carbon (SOC) accounts for nearly 50% of the OC in Urumqi's atmosphere. Principal component analysis revealed that the main sources of carbon components in $PM_{2.5}$ are coal combustion emissions and vehicular exhaust. Overall, severe atmospheric pollution persists during the heating season.

Keywords: atmospheric pollution; organic carbon; elemental carbon; source apportionment; Urumqi City